

Evaluación del impacto de los factores climáticos en el ascenso del nivel del mar sobre el litoral vasco



Proyecto Klimatek 2017-2018

Evaluación del impacto de los factores climáticos en el ascenso del nivel del mar sobre el litoral vasco

©

Ihobe, Ingurumen Jarduketarako Sozietate Publikoa
Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental

EDITA:

Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental
Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial y Vivienda
Gobierno Vasco

Alda. de Urquijo n.º 36-6.^a (Plaza Bizkaia)
48011 Bilbao

info@ihobe.eus

www.ihobe.eus

www.ingurumena.eus

EDICIÓN:

Julio 2019

CONTENIDO:

Este documento ha sido elaborado por Ihobe con la colaboración de Azti Tecnalia.

Fotografía portada: www.argazki.irekia.euskadi.eus - Mikel Arrazola

índice

01. Resumen ejecutivo	05
02. Objetivos y planificación	08
03. Análisis de las series del nivel del mar	09
04. La serie del nivel del mar de Bilbao	11
05. Donostia-San Sebastián y Bilbao: Zonas urbanas en entorno de ribera	14
5.1. Mapas de inundación de Donostia-San Sebastián	
5.2. Mapas de inundación de la ría de Bilbao	
06. Zarautz: Zonas urbanas anexas a playas expuestas al oleaje extremo	17
07. Bermeo: Zonas portuarias en entorno urbano	21
7.1. Mapas de inundación de Bermeo	
7.2. Altura de ola sobre el dique de Bermeo	
08. Conclusiones	26
09. Bibliografía	30
10. Glosario de términos	31
11. Anexos	33

Índice figuras y tablas

Figuras

Figura 1. Cotas máximas de inundación para las zonas piloto de Bilbao y Donostia-San Sebastián	06
Figura 2. Esquema de las cotas en la zona piloto de Zarautz de NMM de Bilbao (NMMB) actual.....	07
Figura 3. Esquema de las cotas en la zona piloto de Bermeo de Nivel Medio del Mar de Bilbao (NMMB) actual.....	07
Figura 4. Evolución del nivel medio del mar a escala anual en Brest (Francia, 1846-2017), Newlyn (Reino Unido, 1917-2017), A Coruña (1945-2017) y Santander (1945-2005).....	09
Figura 5. Evolución del nivel medio del mar en los registros del Cantábrico de Puertos del Estado (Gijón, Santander, Bilbao) y Pasaia	10
Figura 6. Serie de datos de marea en Bilbao	12
Figura 7. Análisis de extremos a una distribución <i>Weibull</i> de los datos del mareógrafo de Bilbao	12
Figura 8. Mapa de inundación de las zonas ribereñas al estuario del Urumea en Donostia-San Sebastián proyectado para el año 2100.....	15
Figura 9. Detalle del mapa de inundación de las zonas ribereñas a la ría de Bilbao proyectado para el año 2100.....	16
Figura 10. Ajuste de extremos de la serie horaria del indicador de cota de inundación para el periodo 2000-2017 ..	17
Figura 11. Ortofoto de la playa de Zarautz.....	18
Figura 12. Zonas con riesgo de inundación por oleaje extremo con $Tr=50$ años en la franja costera de Zarautz	19
Figura 13. Detalle de la zona con riesgo de inundación por oleaje extremo con $Tr=50$ años en Zarautz, bajo condiciones del NMM actual.....	19
Figura 14. Detalle de la zona con riesgo de inundación por oleaje extremo con $Tr=50$ años en Zarautz, bajo condiciones del NMM proyectado para el año 2100 con RCP4.5	20
Figura 15. Detalle de la zona con riesgo de inundación por oleaje extremo con $Tr=50$ años en Zarautz, bajo condiciones del NMM proyectado para el año 2100 con RCP8.5	20
Figura 16. Análisis extremal de la cota de inundación (CI) en los dos puntos de medida de Bermeo respecto al 0 del puerto de Bilbao.....	21
Figura 17. Distribución de la cota de inundación (CI) en metros (considerando $Tr=50$ años) en Bermeo	22
Figura 18. Zonas inundadas de la franja costera de Bermeo bajo condiciones de NMM y una $CI_{50 \text{ años}}$	23
Figura 19. Batimetría en el entorno del puerto de Bermeo y perfiles de cálculo	24

Tablas

Tabla 1. Análisis de extremos (distribución <i>Weibull</i>) de los datos del mareógrafo de Bilbao.....	13
Tabla 2. Contribución en los 12 eventos analizados al nivel total de la marea astronómica y la marea meteorológica de baja y alta frecuencia	13
Tabla 3. Cotas de inundación (CI) en los escenarios analizados en las zonas urbanas de ribera	14
Tabla 4. Áreas afectadas en cada uno de los escenarios analizados en Donostia-San Sebastián (Figura 1).	15
Tabla 5. Áreas afectadas en los escenarios analizados en la ría de Bilbao (Figura 1)	16
Tabla 6. Cota de inundación (CI) y áreas afectadas en cada uno de los escenarios analizados en Zarautz.....	18
Tabla 7. Cota de inundación (CI) y áreas afectadas en cada uno de los escenarios analizados en Bermeo	22
Tabla 8. Altura de ola significativa (H_s) a pie de dique en pleamar asociada a un temporal pésimo con un periodo de retorno (Tr) de 50 años en los perfiles más expuestos al oleaje.....	25
Tabla 9. Cotas de Inundación respecto al NMM en Alicante y respecto al cero del Puerto de Bilbao y áreas afectadas por inundación en los tres escenarios en las zonas piloto de Bilbao y Donostia-San Sebastián	27
Tabla 10. Cotas de Inundación respecto al NMM en Alicante y respecto al cero del Puerto de Bilbao y áreas afectadas por inundación en los tres escenarios considerados en Zarautz	28
Tabla 11. Cotas de Inundación respecto al NMM en Alicante y respecto al cero del Puerto de Bilbao y áreas afectadas por inundación en los tres escenarios considerados en Bermeo.....	29
Tabla 12. Detalles del análisis estadístico aplicado a las series temporales de nivel del mar de cada mareógrafo	33
Tabla 13. Sobrelevación debida a la marea meteorológica en Bilbao, Santander y Gijón.....	33
Tabla 14. Resumen de los resultados del análisis armónico de la serie de datos de Puertos del Estado: Gijón, Santander y Bilbao	34
Tabla 15. Resumen de los resultados del análisis armónico de las series de datos de larga duración: Brest, Newlyn, A Coruña y Santander.....	34
Tabla 16. Variación del nivel medio entre el inicio del registro y el final del conjunto de series de nivel del mar con los diferentes modelos de evolución temporal.....	34
Tabla 17. Variación del nivel medio entre el inicio del registro y el final y pendiente ($mm \text{ año}^{-1}$) al aplicar el modelo lineal a las series de marea filtradas	35

01

Resumen ejecutivo

El nivel del mar está sujeto a la marea astronómica y a la marea meteorológica (viento, presión atmosférica, oleaje, temperatura, etc.). Conocer la contribución de cada componente a la variación total permite estimar la evolución del nivel del mar en escenarios de cambio climático. Se han seleccionado y procesado las series de nivel del mar más próximas a la costa vasca, en el Cantábrico y el golfo de Vizcaya, y se han aplicado un conjunto de técnicas para obtener modelos de evolución a escala decadal y evaluar las tendencias de variación.

La serie más representativa para el País Vasco es la del mareógrafo de Puertos del Estado de Bilbao, ya que la serie de Pasaia es aún demasiado corta para ser fiable, impidiendo establecer diferencias entre Bizkaia y Gipuzkoa. Se ha constatado que la tasa de elevación del Nivel Medio del Mar (NMM) en Bilbao de 1992 a 2017 ($2,83 \text{ mm.año}^{-1}$) es superior a la medida en Santander ($1,50 \text{ mm.año}^{-1}$) y mucho mayor que en Gijón ($0,54 \text{ mm.año}^{-1}$) en el mismo período de tiempo.

Una vez obtenido el valor actual del NMM y los valores extremos de la componente meteorológica, se han considerado distintos escenarios de cambio climático para obtener una proyección a finales del siglo XXI. En particular, se han considerado las proyecciones de evolución del NMM para el año horizonte 2100 y los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 definidos por el IPCC (IPCC, AR5). En concreto, un ascenso del NMM de $+0,45 \text{ m}$ (siguiendo el RCP4.5) y de $+0,65 \text{ m}$ (siguiendo el RCP8.5) (Slangen et al., 2014; Toimil et al., 2016). En todos los escenarios se ha considerado un período de retorno de 50 años, considerándose como valor representativo de un nivel que se alcanzará, en una o

varias ocasiones, desde la actualidad hasta el final del siglo XXI. Se han tenido en cuenta solo las proyecciones de aumento del NMM asumiéndose que el oleaje y la agitación apenas sufrirán cambios en el horizonte de 2100, ya que según estudios recientes (e.g. Camus et al., 2017; Charles et al., 2012) no van a verse notablemente afectados por el cambio climático en el golfo de Vizcaya.

Se plantearon zonas piloto caracterizadas por verse expuestas a distintas casuísticas. Son zonas urbanas anexas a playas expuestas al oleaje extremo (Zarautz), zonas urbanas en entornos las riberas (estuario del Nervión/Ría de Bilbao y cauce del Urumea en Donostia-San Sebastián) y zonas portuarias en entornos urbanos (Bermeo) donde el oleaje y la agitación portuaria pueden dañar las estructuras portuarias, barcos e inundar de zonas adyacentes:

I. Zonas urbanas en entorno de Ribera: Donostia-San Sebastián y Bilbao

Con alta incidencia del ascenso del NMM en la planificación territorial.

- a. **En la Ribera del Urumea** (Donostia-San Sebastián). Las zonas actualmente inundables bajo estas condiciones comprenden áreas del barrio de Loiola, Txomin Enea y polígono Bidebidarte (Astigarraga). Estas zonas inundables podrían ampliarse en el horizonte 2100 sobre todo en los barrios de Loiola y Martutene (Figura 8) en el caso del RCP4.5 el área inundable aumentaría en $15,4 \text{ ha}$ y en el caso del escenario RCP8.5 aumentaría en $21,9 \text{ ha}$.

b. **En la Ría de Bilbao** (Figura 9). Las zonas más vulnerables a la inundación son actualmente los barrios de Alzaga y Zorrotzaurre. En el año horizonte 2100, con los escenarios climáticos y la aproximación metodológica utilizada, las zonas inundables se extenderían a Ibarzabarra-Sestao (unas 120 ha) con el escenario RCP4.5 y al barrio de Lamiako con el escenario RCP8.5 (unas 224 ha).

Tanto en Bilbao como en Donostia-San Sebastián no se consideró el efecto del oleaje (las zonas de estudio son zonas del cauce fluvial intermareales y protegidas en gran medida del oleaje) y se asumió una cota máxima de inundación uniforme en todo el dominio de estudio (Figura 1).

II. Zonas urbanas anexas a playas expuestas al oleaje extremo: Zarautz

Se analizó la inundación por combinación de marea y oleaje extremo. El oleaje que llega a la costa, debido a la forma de bahía de la zona, la presencia de cabos (el ratón de Getaria, por ejemplo) y la existencia de obras de abrigo del oleaje, presenta una notable variabilidad espacial a una escala del orden de las decenas de metros. De este modo se han estimado las condiciones de oleaje (altura, período y dirección) y altura de marea que, en los escenarios actual y de ascenso del NMM por cambio climático, darán lugar a inundación por rebase (Figura 12 y Figura 15). Con el NMM actual amplias zonas urbanizadas próximas al paseo de Zarautz son inundables con oleaje extremo. En los escenarios RCP4.5 (Figura 12 y Figura 15, centro) y RCP8.5 (Figura 12 y Figura 15, abajo) de ascenso previsto del nivel

del mar las zonas afectadas no aumentan sensiblemente (0,4 y 0,7 ha, respectivamente), pero prácticamente todo el paseo marítimo se inundaría con nivel extremo o severo.

III. Zonas portuarias en entornos urbanos: Bermeo

Zona portuaria que presenta riesgo de daños a las obras de abrigo y a la actividad portuaria debido a: el ascenso del Nivel Medio del Mar (NMM), la marea (astronómica y meteorológica) y la resonancia portuaria (Figura 3). La resonancia portuaria causada por el oleaje incidente en el puerto muestra una fuerte variabilidad espacial a escala de metros dentro de una zona fuertemente abrigada como es ésta.

- El aumento del nivel medio del mar por cambio climático a finales del siglo XXI aumentará en Bermeo la zona potencialmente inundable entre 6,4 ha (RCP4.5) y 7,4 ha (RCP8.5).
- Se ha analizado también el efecto que el aumento del NMM del mar podría suponer sobre el tamaño de los bloques del dique de abrigo del puerto. El peso de los bloques depende del cubo de la altura de ola incidente a pie de talud del dique, la cual, podría verse afectado por un incremento del nivel del mar durante la tormenta de diseño. Por otra parte, el aumento del calado debido al aumento del nivel medio daría lugar a menor pérdida de energía del oleaje y por tanto a un pequeño incremento de la altura de ola. En este aspecto los resultados obtenidos no muestran un impacto significativo que suponga una merma del abrigo de las obras del puerto.

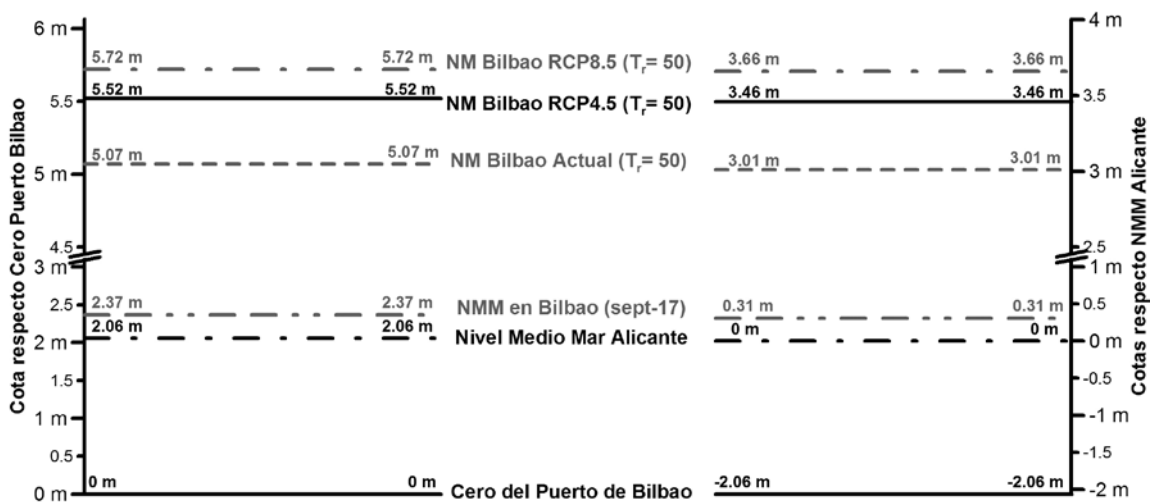


Figura 1. Cotas máximas de inundación para las zonas piloto de Bilbao y Donostia-San Sebastián. Esquema de las cotas de NMM de Bilbao (NMMB) actual, del NMMB actual para el período de retorno de 50 años (T_r) debido a la marea astronómica y meteorológica y NMMB con el Ascenso del Nivel del Mar en 2100 de los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. El eje de la izquierda son las cotas referidas al cerro del Puerto de Bilbao y el eje de la derecha las cotas referidas al NMM en Alicante (nivelación realizada por el I Instituto Geográfico Nacional en 2008).

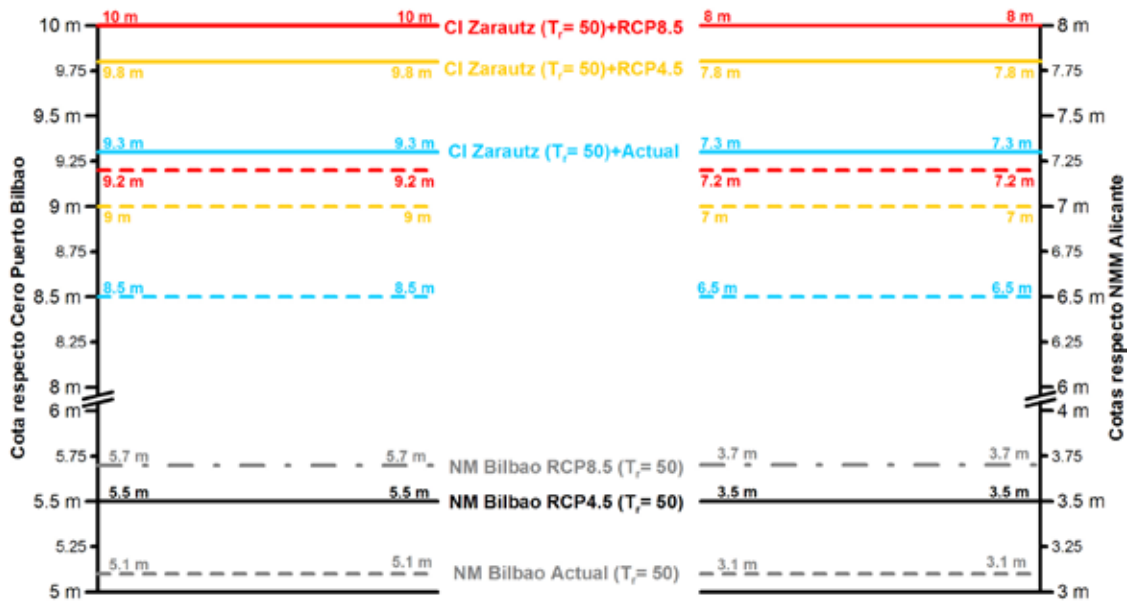


Figura 2. Esquema de las cotas en la zona piloto de Zarautz de NMM de Bilbao (NMMB) actual, del NMMB actual para $T_r = 50$ años debido a la marea astronómica y meteorológica y NMMB con el Ascenso del Nivel del Mar en 2100 de los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. El eje de la izquierda son las cotas referidas al cero del Puerto de Bilbao en septiembre de 2017 y el eje de la derecha las cotas referidas al NMM en Alicante (nivelación realizada por el I Instituto Geográfico Nacional en 2008).

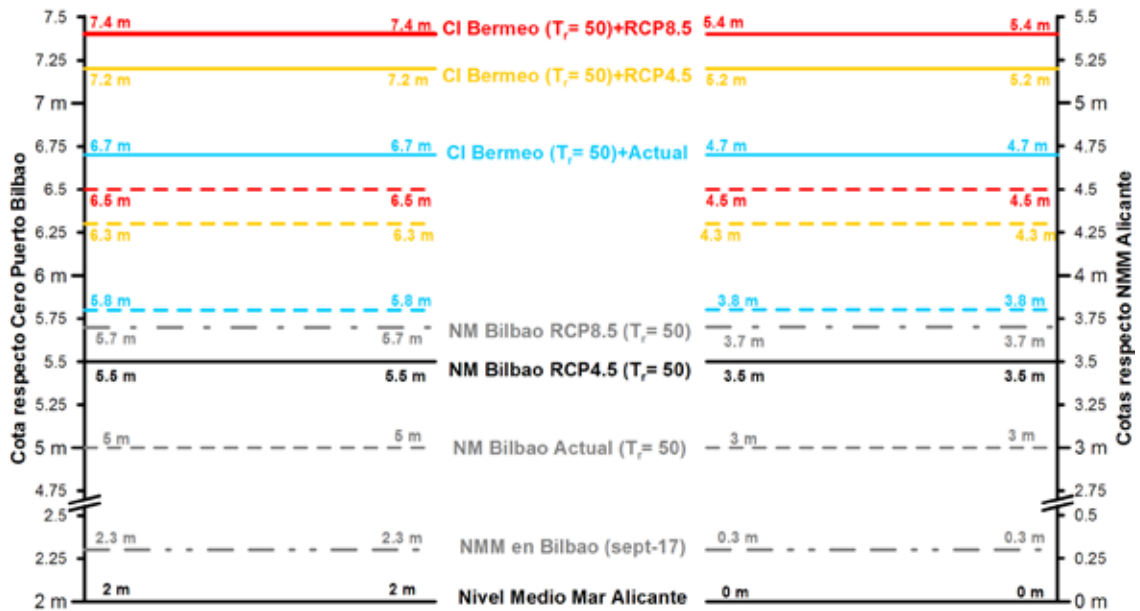


Figura 3. Esquema de las cotas en la zona piloto de Bermeo de Nivel Medio del Mar de Bilbao (NMMB) actual, del NMMB actual para $T_r = 50$ años debido a la marea astronómica y meteorológica y NMMB con el Ascenso del Nivel del Mar en 2100 de los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. El eje de la izquierda son las cotas referidas al cero del Puerto de Bilbao en septiembre de 2017 y el eje de la derecha las cotas referidas al NMM en Alicante (NMMA IGN-2008).

02

Objetivos y planificación

El proyecto: “Evaluación del impacto de los componentes del ascenso del nivel del mar de origen climático sobre el litoral vasco (KLIMPACT)”, tiene como objetivos:

- La cuantificación de alta precisión ($\sim 10^{-3}$ m, mm) de los componentes del nivel del mar.
- La contribución de cada componente al ascenso observado durante los últimos años
- Evaluar su impacto sobre la costa del País Vasco.

Para la realización de este análisis se llevaron a cabo las siguientes tareas:

- Recopilación de la información existente sobre la variación del nivel del mar en el golfo de Vizcaya.
 - Realización de una base de datos y su tratamiento
 - Aplicación de modelos de evolución de series temporales y su filtrado. Cálculo de extremos del nivel del mar.
 - Modelización de la inundación sobre Modelo Digital de Elevaciones (MDE).
 - Elaboración de mapas de inundación y cálculo del efecto del oleaje sobre un caso práctico (el dique de Bermeo).
- **Infraestructuras críticas.** Se toma como ejemplo la zona portuaria de Bermeo que presenta riesgo de daños a las obras de abrigo y a la actividad portuaria debido al ascenso del Nivel Medio del Mar (NMM), a la marea meteorológica (de alta y baja frecuencia) y a la agitación y la resonancia portuaria.
 - **Zonas urbanas.** Se han seleccionado dos zonas con alta incidencia del ascenso del nivel del mar en la planificación territorial: Ría de Bilbao y Ribera del río Urumea en Donostia-San Sebastián. En ambas zonas tienen especial incidencia los efectos de la marea meteorológica de alta frecuencia. En estas localidades se cartografían las áreas inundables por el ascenso del NMM y la marea meteorológica (de alta y baja frecuencia).
 - **Paseos marítimos.** Se han elaborado mapas de inundación con la combinación de efectos de nivel del mar e inundación debida al oleaje extremo en Zarautz. Para ello, es necesario estimar las condiciones de oleaje (altura, período y dirección) y altura de marea que en los escenarios actual y de ascenso del NMM por cambio climático darán lugar a inundación por rebase en el paseo de Zarautz.

Se han tenido en cuenta distintas aproximaciones al problema debido a que el impacto en costa variará en primer lugar en función de los forzamientos climáticos y en segundo lugar en función de las características de la zona costera expuesta. Por lo tanto, se han considerado tres zonas piloto distintas que son representativas de gran parte del litoral vasco:

03

Análisis de las series del nivel del mar

Las series temporales utilizadas para el análisis del nivel del mar en el golfo de Vizcaya se muestran en la Figura 4 y Figura 5. En el apartado de ANEXOS se incluyen los resultados de los análisis aplicados sobre estas series y de más información generada.

Para estudiar las tendencias del nivel del mar y detectar cambios bruscos, las series del nivel del mar de los mareó-

grafos han sido tratadas mediante un método de rellenado de huecos en las series y filtrado. Se ha observado que el método de reconstrucción de datos es un método eficaz para obtener series de datos del nivel del mar continuas. Posteriormente, se aplicaron tres distintos modelos de evolución y filtrado: 1 - KZA, 2 - modelo de cambio brusco de tendencia y; 3 - modelo de transición en rampa. Los modelos de evolución presentan un mejor comportamien-

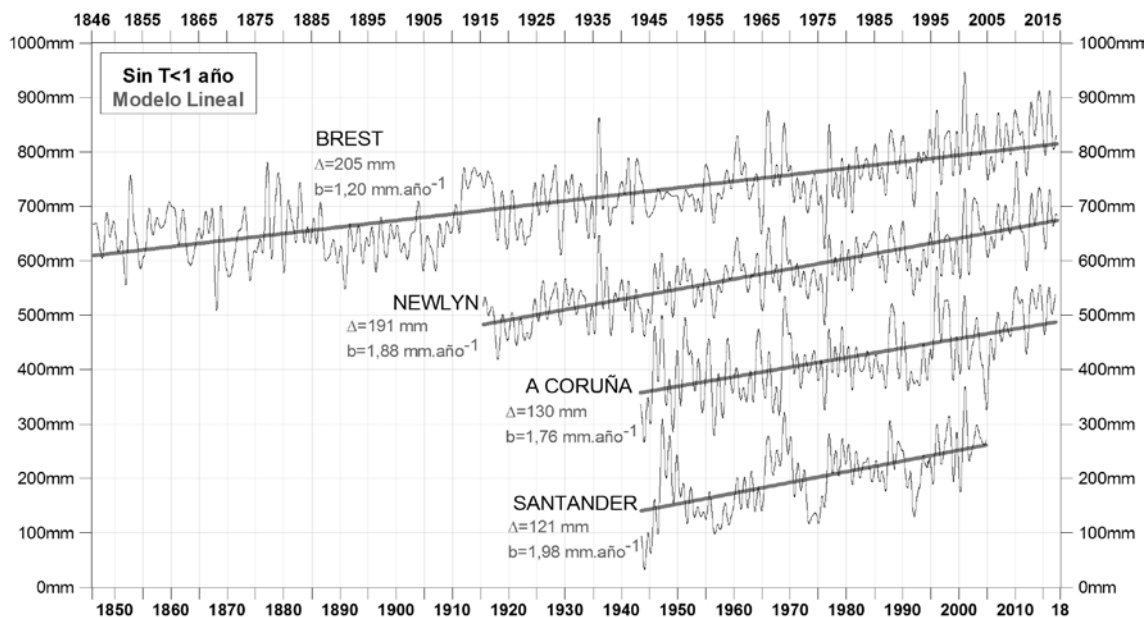


Figura 4. Evolución del nivel medio del mar a escala anual en Brest (Francia, 1846-2017), Newlyn (Reino Unido, 1917-2017), A Coruña (1945-2017) y Santander (1945-2005) y la línea de tendencia lineal de evolución e incremento del nivel medio del mar a lo largo del período de duración de cada una de las series. Δ : incremento del nivel medio del mar desde el inicio hasta el final del registro; b : pendiente de la línea de tendencia (o tasa de cambio del nivel medio del mar).

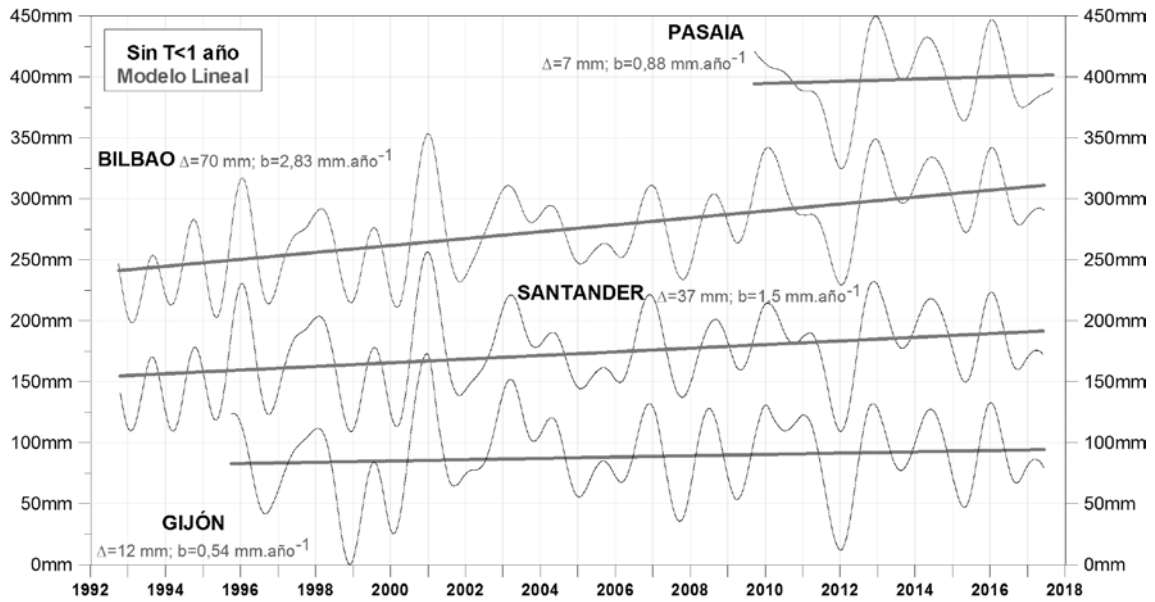


Figura 5. Evolución del nivel medio del mar en los registros del Cantábrico de Puertos del Estado (Gijón, Santander, Bilbao) y Pasaia y la línea de tendencia lineal de evolución e incremento del nivel medio del mar a lo largo del período de duración de cada una de las series. Δ : incremento del nivel medio del mar desde el inicio hasta el final del registro; b: pendiente de la línea de tendencia (o tasa de cambio del nivel medio del mar).

to, en base a los resultados estadísticos, a medida que se aumenta el periodo de filtrado; siendo máximo cuando se filtran los periodos <5 años y <10 años en las series cortas y largas, respectivamente.

Generalmente, el modelo de evolución que mejores resultados presenta, en términos de correlación y error, es el modelo de cambio brusco de tendencia, aunque el modelo de transición en rampa muestra resultados similares. El modelo que peores resultados muestra, es decir que presenta un menor ajuste con las observaciones, es el KZA.

Aunque, dependiendo del modelo de evolución y del periodo de filtrado que utilizemos, se observan cambios bruscos de tendencia en distintas fechas, en la mayor parte de los casos, y para todos los mareógrafos, se observa una tendencia positiva en el nivel medio del mar.

04

La serie del nivel del mar de Bilbao

De los análisis realizados se concluyó que la serie de Pasaia era aún demasiado reciente como para aportar información fidedigna, por lo que el análisis se centró en la serie de datos de nivel del mar de Bilbao procedentes de Puertos del Estado. El procedimiento para el cálculo de los extremos de nivel del mar en Bilbao ha sido:

- Obtención de datos del registro bruto 5 minutarario del mareógrafo de Bilbao.
- Se ha empleado la metodología POT (*Peak Over Threshold*), con un umbral de excedencia definido y número mínimo de datos entre picos de 6 horas.
- Estimar las probabilidades de ocurrencia de los diferentes valores máximos.
- Estimar los parámetros de la distribución estadística elegida a partir del ajuste a las probabilidades obtenidas anteriormente. En este caso se ha elegido la distribución *Weibull* que emplea Puertos del Estado.
- Cálculo del valor para los períodos de retorno usualmente empleados y estimación del intervalo de confianza mediante simulación de *Monte Carlo*.

La distribución *Weibull* utilizada es la siguiente:

$$F_W(x) = \text{Prob}[X < x] = 1 - e^{-\left[\frac{x-\alpha}{\beta}\right]^\gamma}$$

Donde x es el valor del indicador de inundación para la cual se desea calcular su probabilidad asociada y X es la variable estadística que representa la máxima cota anual. Los parámetros (α , β , γ) son los parámetros que se han de ajustar en cada caso. Para las simulaciones *Monte Carlo* se emplea la relación inversa:

$$x = \alpha_{opt} + \beta_{opt} \left[\ln \left(\frac{1}{1-F} \right) \right]^{\frac{1}{\gamma_{opt}}}$$

que permite generar una nueva muestra de datos de cotas de inundación a partir de un generador de números aleatorios uniforme en el intervalo $[0, 1]$.

A partir del registro se ha obtenido una serie referenciada al nivel medio variable (ajuste lineal) calculado en la Fase I de KLIMPACT. En esta serie se calculado la contribución de la marea astronómica (análisis armónico) y la marea meteorológica (residuo), Figura 6. El residuo a su vez se ha separado en dos series mediante el filtrado con un periodo de corte de 2 h. Así se obtiene una serie con la marea meteorológica de alta variabilidad (alta frecuencia) y un residuo de variabilidad lenta (baja frecuencia). El parámetro λ es el número medio de temporales por año presentes en el conjunto de datos (con el umbral de cota y separación entre picos definido).

En la serie de marea meteorológica de alta frecuencia se observa un cambio a finales del año 2009. Este cambio es coincidente con un cambio en la posición y el tipo de sensor del mareógrafo. En la serie previa a 2009 los valores de la señal de alta frecuencia son claramente superiores lo que puede estar asociado al punto de medida. Aun así, en este tramo de la serie se observan también datos puntuales muy superiores a los adyacentes y no coherentes con los procesos estudiados. Por ello se ha realizado un filtrado adicional de la serie previa a 2009 con un periodo de corte de 15 min.

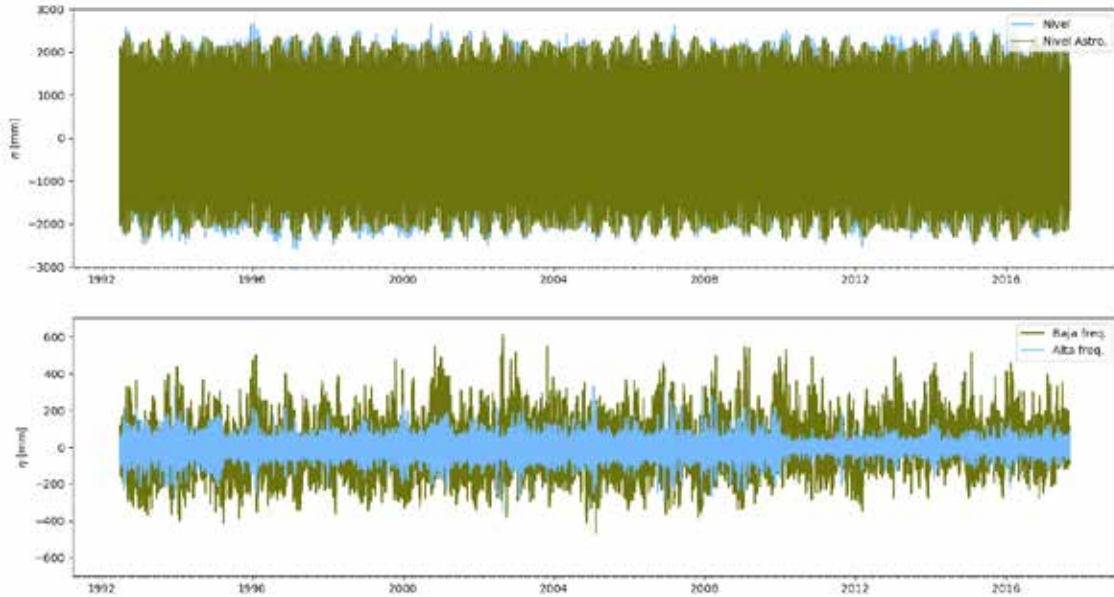


Figura 6. Serie de datos de marea en Bilbao. (Arriba) Datos brutos, parte correspondiente a la marea astronómica y marea. (Abajo) Marea meteorológica de baja y alta frecuencia.

Se ha realizado un ajuste de *Weibull* (Figura 7 y Tabla 1) de los datos extremos con:

- Umbral de pleamar viva media (η_{99}) = 2,07 m (4,4 m Bilbao con el nivel medio actual).
- POT sobre una cota de 2,42 m (4,75 m Bilbao con el nivel medio actual).

– Distancia mínima entre picos de 6 horas (para que sean picos en torno a pleamares independientes).

El escenario de nivel del mar extremo en Bilbao, con una probabilidad de ocurrencia asociada a un Tr de 50 años, tiene un valor de 270 cm (Tabla 1). Este nivel se alcanza en base a la contribución de tres procesos de diferente origen y/o variabilidad temporal:

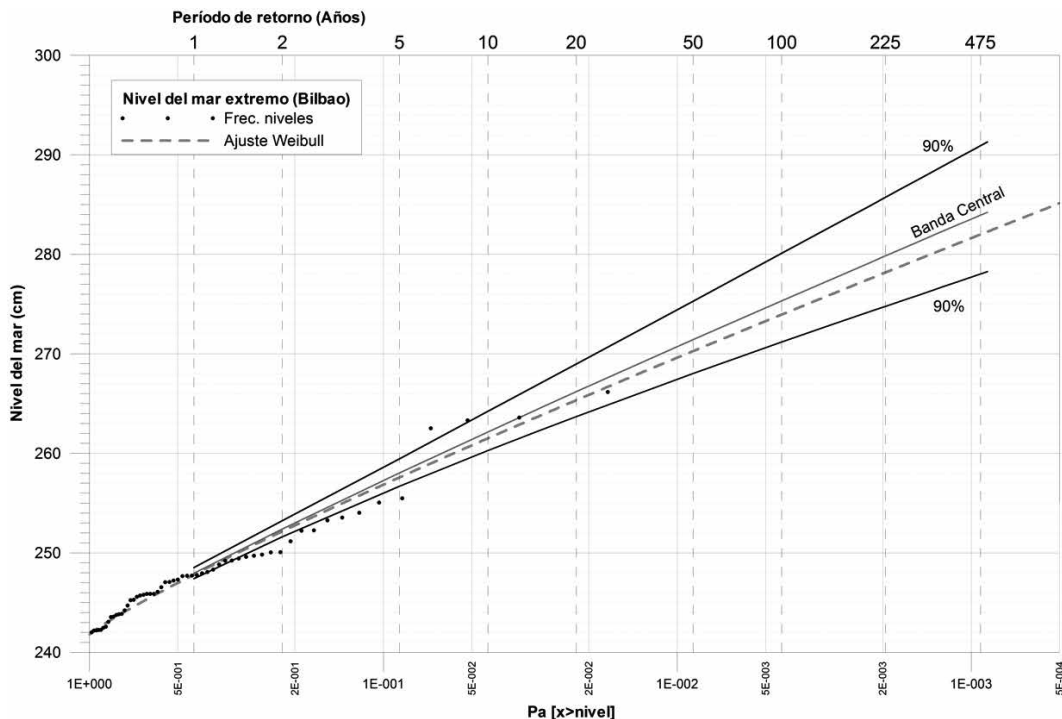


Figura 7. Análisis de extremos a una distribución *Weibull* de los datos del mareógrafo de Bilbao.

Tr (Años)	20	50	225	475	500
Cota respecto al NMM en Bilbao (m)	2,65	2,70	2,78	2,82	2,83

Tabla 1. Análisis de extremos (distribución *Weibull*) de los datos del mareógrafo de Bilbao. En negrita se marca la cota correspondiente a Tr=50 años que se utilizará en el análisis de inundabilidad.

- La marea astronómica: 240,6 cm (89,1% sobre 270 cm).
- La marea meteorológica de variabilidad/frecuencia baja ($T > 2h$) de origen presumiblemente barométrico/atmosférico: 26,2 cm (9,7%).
- La marea meteorológica de alta frecuencia ($T < 2h$), debida a la llegada de ondas de forzamiento meteorológico. 3,2 cm (1,2%).

astronómica (2,49 m) para estimar la contribución de los distintos procesos (marea astronómica y meteorológica) a los máximos de nivel.

Estos procesos de alta frecuencia, al contrario que las otras dos componentes del nivel tendrán una variabilidad importante a lo largo del estuario del Nervión, con la presencia de máximos y mínimos de amplitud. Además, por la ubicación del punto de medida es muy probable que este proceso se esté midiendo cerca de un nodo (mínimas amplitudes) y sería la mayor fuente de incertidumbre para trasladar estas cotas a todo el estuario.

La contribución del residuo total meteorológico en algunos de los máximos observados llega al 18%, casi 50 cm.

La Tabla 2 muestra 12 eventos independientes (máximos en torno a una pleamar) superiores a la pleamar máxima

Nº evento	Año	Mes	Día	Hora	Minuto	Segundo	Nivel total (mm)	Nivel astronómico (mm)	Nivel Baja Frecuencia (mm)	Nivel Alta Frecuencia (mm)
1	1992	8	29	15	49	59	2555	2383,9	154	18
2	1992	12	24	4	54	59	2633	2200,7	357	76
3	1996	1	22	4	19	59	2662	2297,7	306,2	58
4	1996	2	20	4	14	59	2523	2298,7	147	77
5	1999	10	24	15	9	59	2535	1076,6	417	41
6	2000	9	28	15	29	59	2636	2188,4	340	108
7	2002	9	8	16	14	59	2498	2350,2	139	9
8	2007	3	20	3	49	59	2622	2341,2	147	137
9	2010	3	1	3	19	59	2522	2245,4	270	7
10	2014	2	1	4	9	59	2501	2275,4	193	32
11	2014	3	2	3	39	59	2500	2265,1	218	17
12	2014	3	3	4	24	59	2540	2244,7	278,2	17,5

Tabla 2. Contribución en los 12 eventos analizados al nivel total de la marea astronómica y la marea meteorológica de baja y alta frecuencia.

05

Donostia-San Sebastián y Bilbao: Zonas urbanas en entorno de ribera

En cada zona piloto se ha evaluado el riesgo de inundación (actual y futuro para 2100) y se han generado mapas de riesgo usando Modelos Digitales de Elevación (MDE) de alta resolución de Geoeuskadi¹. Estos mapas de inundación se han elaborado sobre MDE de la superficie desnuda del terreno y se muestran como zonas inundables edificios o construcciones más altas que la cota de inundación, pero que en la base estarían inundadas.

La aproximación sigue la metodología descrita por *Chust et al.* (2010, 2011), usando los últimos escenarios de ascenso del nivel del mar, *Representative Concentration Pathways* (RCP) descritos en el último informe del IPCC (IPCC, 2013). En particular, se han considerado las proyecciones de evolución del NMM para el año horizonte 2100

y los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 definidos por el IPCC (IPCC, AR5). Los valores considerados de las proyecciones correspondientes al golfo de Vizcaya son: +0,45 m (RCP4.5) y +0,65 m (RCP8.5) (*Slangen et al.*, 2014; *Toimil et al.*, 2016).

Además, en estas dos zonas piloto no se han contemplado efectos de variación del nivel medio del mar debido al oleaje, asumiéndose un efecto de ascenso del nivel uniforme en todo el dominio de estudio. Ambas zonas son vulnerables a la inundación por marea astronómica y marea meteorológica de alta frecuencia. En la Tabla 3 se muestran las cotas consideradas para la determinación de las áreas inundables en la actualidad y en los dos escenarios de cambio climático.

Escenario	CI respecto al NMM en Alicante	CI respecto al cero del Puerto de Bilbao ²
Actual	3,01 m	5,07 m
RCP4.5	3,46 m	5,52 m
RCP8.5	3,66 m	5,72 m

Tabla 3. Cotas de inundación (CI) en los escenarios analizados en las zonas urbanas de ribera.

¹ ftp://ftp.geo.euskadi.eus/lidar/MDE_LIDAR_2016_ETRS89/MDT.j

² Se ha utilizado como referencia del Nivel del Mar en este estudio la serie de datos de Puertos del Estado del mareógrafo de Bilbao).

5.1. Mapas de inundación de Donostia-San Sebastián

En la Tabla 4 se indican las dimensiones de las áreas afectadas para cada uno de los escenarios considerados para Donostia-San Sebastián. El incremento de área de los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 se calculan como la diferencia con el área del Escenario Actual. En la Figura 8 se representan las zonas inundables para final del siglo XXI bajo los dos escenarios climáticos (RCP4.5, +0,45 m, en color naranja y RCP8.5, +0,65 m, en color rojo). Para el año

2100 y bajo los escenarios RCP4.5 (manchas naranjas de la Figura 8) y RCP8.5 (manchas rojas de la Figura 8) y bajo las mismas condiciones de eventos extremos, las zonas actualmente inundables se extienden hacia el interior del estuario del Urumea, sobre todo bajo el escenario RCP8.5.

Las zonas actualmente inundables bajo estas condiciones (periodo de retorno Tr50, Cota de Inundación +5,07 m respecto al cero del Puerto de Bilbao, Figura 1) están mostradas en azul y comprenden áreas del barrio de Loiola, Txomin Enea y polígono Bidebidarte (Astigarraga). Estas zonas inundables podrían ampliarse en el horizonte 2100 sobre todo en los barrios de Loiola y Martutene.

Escenario	Área afectada respecto al NMMA (ha)	Incremento de área inundable (ha)
Actual	4,5	–
RCP4.5	19,9	15,4
RCP8.5	26,4	21,9

Tabla 4. Áreas afectadas en cada uno de los escenarios analizados en Donostia-San Sebastián (Figura 1).

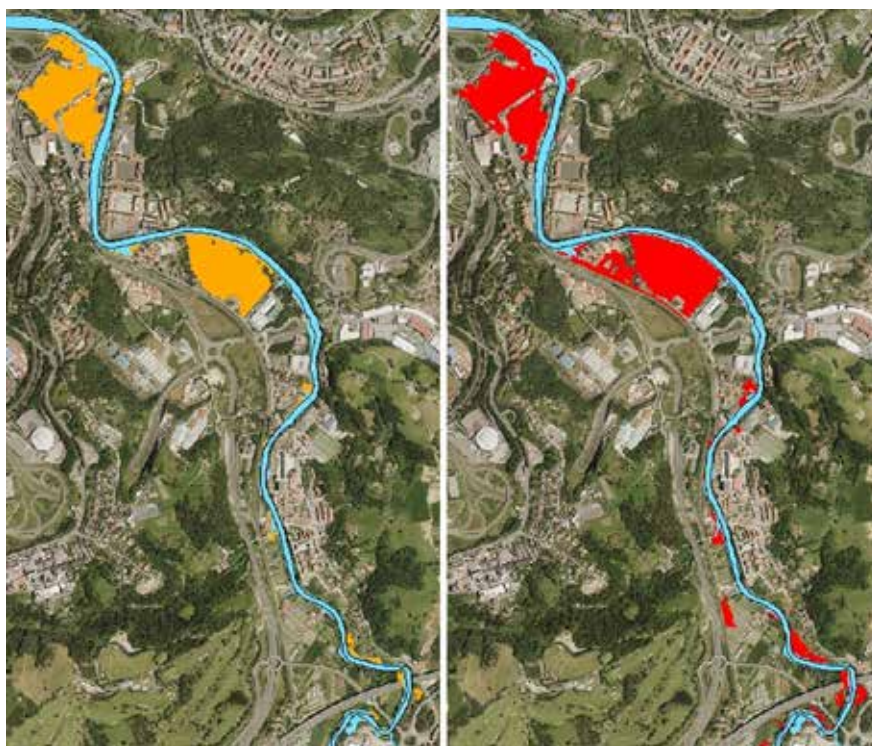


Figura 8. Mapa de inundación de las zonas ribereñas al estuario del Urumea en Donostia-San Sebastián proyectado para el año 2100, bajo un escenario RCP4.5 (izquierda) y RCP8.5 (derecha). La línea negra delimita la línea de costa (NMMA IGN-2008), en azul se muestran las zonas actualmente inundables por el efecto de la marea astronómica y la marea meteorológica de alta frecuencia. En naranja (izquierda) y rojo (derecha) se marcan las zonas inundables para el año horizonte 2100 bajo ambos escenarios.

5.2. Mapas de inundación de la ría de Bilbao

En la Tabla 5 se indican las dimensiones de las áreas afectadas para cada uno de los escenarios considerados para la ría de Bilbao. El incremento de área de los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 se calculan como la diferencia con el área del Escenario Actual. En la Figura 9 se presentan las zonas inundables en 2100, bajo los dos escenarios climáticos RCP4.5 (+0,45 m) y RCP8.5 (+0,65 m). En color azul se muestran las áreas inundables actualmente (periodo de retorno TR50, cota de inundación de +5,07 m respecto al cero del Puerto de Bilbao, Figura 1).

Las zonas actualmente inundables en eventos extremos de periodo de retorno de 50 años aumentarían en los escenarios RCP4.5 (120 ha, manchas naranjas de la Figura 9) y especialmente bajo el escenario más pesimista RCP8.5 (224 ha, manchas rojas de la Figura 9).

Las zonas más vulnerables a la inundación son los barrios de las áreas más bajas, en la actualidad: Altzaga y Zorrotzaurre. En el año horizonte 2100, con los escenarios climáticos y la aproximación utilizada, las zonas inundables se extenderían a Ibarzaharra-Sestao con el escenario RCP4.5 y al barrio de Lamiako con el escenario RCP8.5.

Escenario	Área afectada respecto al NMMA (ha)	Incremento de área inundable (ha)
Actual	107	–
RCP4.5	227	120
RCP8.5	331	224

Tabla 5. Áreas afectadas en los escenarios analizados en la ría de Bilbao (Figura 1).



Figura 9. Detalle del mapa de inundación de las zonas ribereñas a la ría de Bilbao proyectado para el año 2100, bajo un escenario RCP4.5 (izquierda) y RCP8.5 (derecha). La línea negra delimita la línea de costa (NMMA IGN-2008), en azul se muestran las zonas actualmente inundables por el efecto de la marea astronómica y la marea meteorológica de alta frecuencia. En naranja (izquierda) y rojo (derecha) se marcan las zonas inundables para el año horizonte 2100 bajo ambos escenarios.

06

Zarautz: Zonas urbanas anexas a playas expuestas al oleaje extremo

Zarautz es una zona urbana vulnerable a inundación por combinación de marea (astronómica y meteorológica) y oleaje. Debido al oleaje la variabilidad espacial de la inundación es notable en esta zona de estudio.

Se ha reconstruido la serie horaria del indicador de cota de inundación (CI), entre 2000 y 2017, siendo la serie más larga disponible en la costa vasca de medidas de nivel del mar y características del oleaje en mar abierto. Existen series temporales de oleaje más largas, pero en todos los

casos las características del oleaje son obtenidas a partir de simulación numérica, presentando errores importantes en la caracterización de los eventos extremos.

Como se puede observar en la Figura 10 en la que se muestra el resultado obtenido del análisis extremal del indicador de impacto en costa (Liria et al., 2013), la cota asociada a un periodo de retorno de 50 años es de 8,5 m respecto al 0 de Bilbao (Banda Central, línea de color gris de la Figura 10), o 6,44 m (diferencia de cota entre el cero

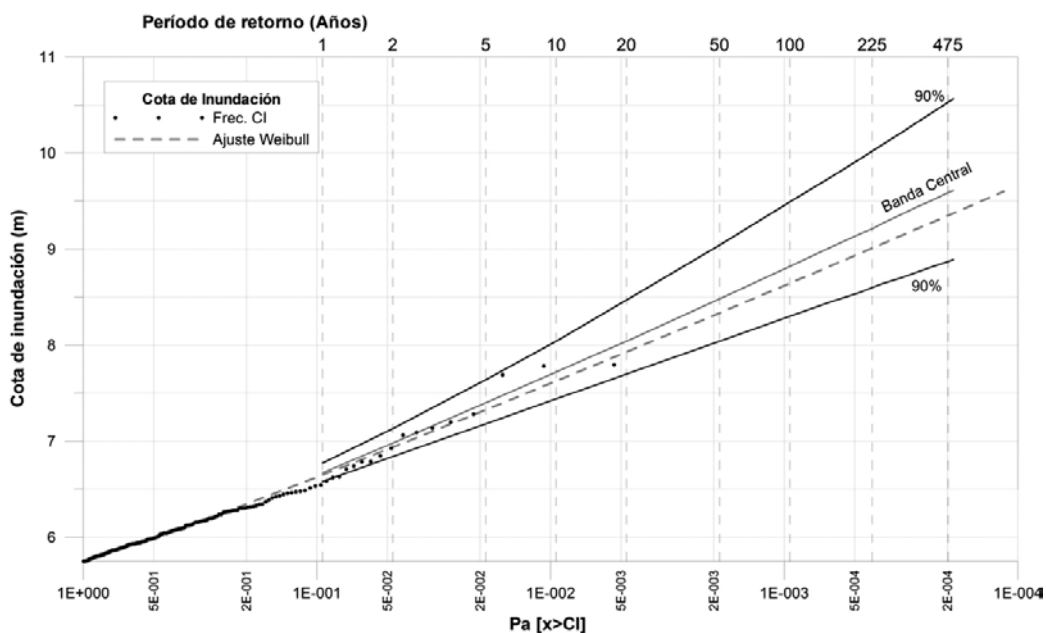


Figura 10. Ajuste de extremos de la serie horaria del indicador de cota de inundación para el periodo 2000-2017.

del Puerto de Bilbao al NMMA IGN-2008 = 2,06 m). En este estudio se ha usado un valor ligeramente superior al 6,44 m: 6,50 m.

Con este valor se ha estimado la Cota de Inundación CI en el frente costero durante un evento extremo de oleaje y marea coincidente con el indicador de inundación de $T_r = 50$ años. La distribución de la CI obtenida (Figura 11) varía de oeste a este de la playa entre 6,5 m y 7,3 m sobre NMM en Alicante.

En la Tabla 6 se muestran las cotas de inundación consideradas en el caso de Zarautz y las áreas afectadas por inundación en el escenario actual, en RCP4.5 (+0,45 m) y en RCP8.5 (+0,65 m).

Considerando esta distribución de CI y el NMM actual, observamos como amplias zonas de la zona urbanizada de la franja costera, son inundables bajo eventos de marea (astronómica y meteorológica) y oleaje extremo (Figura 12, la escala de colores representa los niveles máximos de la lámina de agua alcanzados con respecto al terreno actual, en cada escenario). El riesgo de inundación en Zarautz es

mayor al oeste, aunque la CI sea menor, debido a que el paseo también baja hacia el oeste siendo mayor la disminución de cota que la disminución en la CI (2 m de disminución en la cota del paseo frente a 0,8 m de variación de la cota de inundación).

Como puede observarse, con el NMM actual (Figura 12, arriba y Figura 13), amplias zonas urbanizadas de la franja costera son inundables con oleaje extremo. En los escenarios RCP4.5 (Figura 12 y Figura 14) y RCP8.5 (Figura 12 y Figura 15) de ascenso previsto del nivel del mar, prácticamente todo el paseo marítimo se inundaría con nivel extremo (zonas sombreadas de rojo) o severo (zonas sombreadas de color naranja).

Cabe destacar que este supuesto de cambio climático, en la práctica, supone que el nivel de impacto que sufre hoy en día la zona oeste del frente urbano (con daños importantes y repetidos en mobiliario y locales comerciales en eventos extremos), se trasladaría a todo el frente urbano; también aumentaría el impacto por inundación en la carretera que une Zarautz y Getaria.



Figura 11. (Arriba) Ortofoto de la playa de Zarautz. (Abajo) Distribución de la CI (m) sobre el NMM IGN-2008 por oleaje extremo ($T_r = 50$ años), a lo largo de la franja litoral de Zarautz. La línea negra delimita la línea de costa.

Escenario	CI respecto al NMM en Alicante	CI respecto al cero del Puerto de Bilbao	Área afectada respecto al NMMA (ha)	Incremento de área inundable (ha)
Actual	[6,5 m – 7,3 m]	[8,5 m – 9,3 m]	18,1	–
RCP4.5	[7 m – 7,8 m]	[9 m – 9,8 m]	18,5	0,4
RCP8.5	[7,2 m – 8 m]	[9,2 m – 10 m]	18,8	0,7

Tabla 6. Cota de inundación (CI) y áreas afectadas en cada uno de los escenarios analizados en Zarautz.

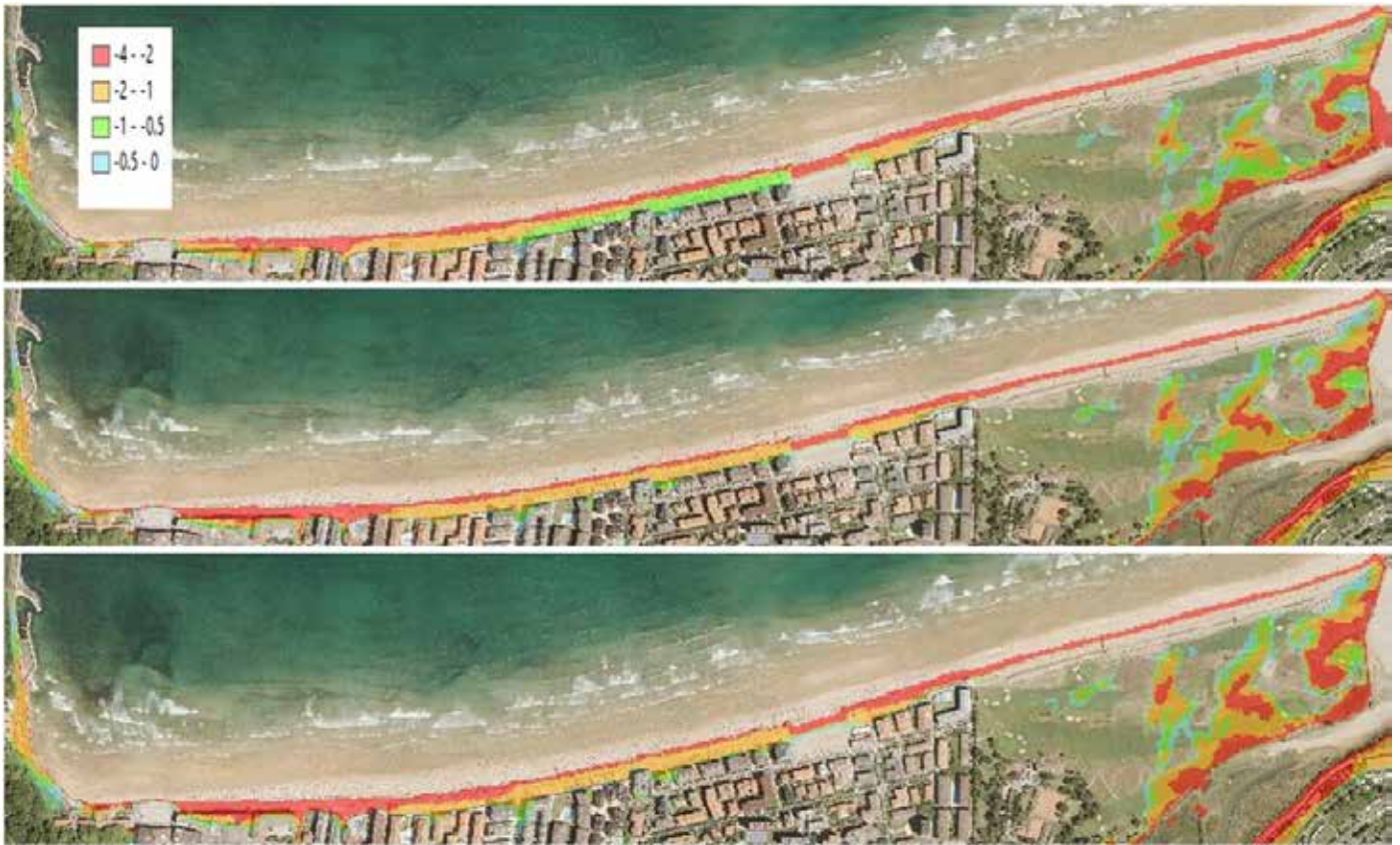


Figura 12. Zonas con riesgo de inundación por oleaje extremo con $Tr=50$ años en la franja costera de Zarautz, bajo condiciones del NMM actual (arriba), del NMM proyectado para el año 2100 con el escenario climático RCP4.5 (centro) y RCP8.5 (abajo). Los colores indican los rangos de altura de la lámina de agua (m) sobre las zonas inundadas en esos escenarios.



Figura 13. Detalle de la zona con riesgo de inundación por oleaje extremo con $Tr=50$ años en Zarautz, bajo condiciones del **NMM actual**. Los colores indican los rangos de altura de la lámina de agua (en metros) en dichas zonas inundables. A la izquierda se muestra una zona situada en el centro-oeste del paseo marítimo y a la derecha la zona oeste que comprende el puerto, la Munoa, el palacio de Narros, el puerto y la carretera Zarautz-Getaria.



Figura 14. Detalle de la zona con riesgo de inundación por oleaje extremo con $Tr=50$ años en Zarautz, bajo condiciones del **NMM proyectado para el año 2100 con RCP4.5**. Los colores indican los rangos de altura de la lámina de agua (en metros) en dichas zonas inundables. A la izquierda se muestra una zona situada en el centro-oeste del paseo marítimo y a la derecha la zona oeste que comprende el puerto, la Munoa, el palacio de Narros, el puerto y la carretera Zarautz-Getaria.



Figura 15. Detalle de la zona con riesgo de inundación por oleaje extremo con $Tr=50$ años en Zarautz, bajo condiciones del **NMM proyectado para el año 2100 con RCP8.5**. Los colores indican los rangos de altura de la lámina de agua (en metros) en dichas zonas inundables. A la izquierda se muestra una zona situada en el centro-oeste del paseo marítimo y a la derecha la zona oeste que comprende el puerto, la Munoa, el palacio de Narros, el puerto y la carretera Zarautz-Getaria.

07

Bermeo: Zonas portuarias en entorno urbano

El puerto de Bermeo es una infraestructura crítica por riesgo para la actividad portuaria debido al ascenso del NMM, la marea meteorológica y la resonancia portuaria. Se ha calculado la CI de $Tr = 50$ años en la situación actual del NMM, como se ha descrito reconstruyendo los

datos horarios de la cota máxima alcanzada por la lámina de agua en base a la suma de la marea y la resonancia portuaria. En la Figura 16 se representa el análisis extremal de la CI tanto en el punto donde está instalado el mareógrafo actualmente y en la zona de Portuzaharra.

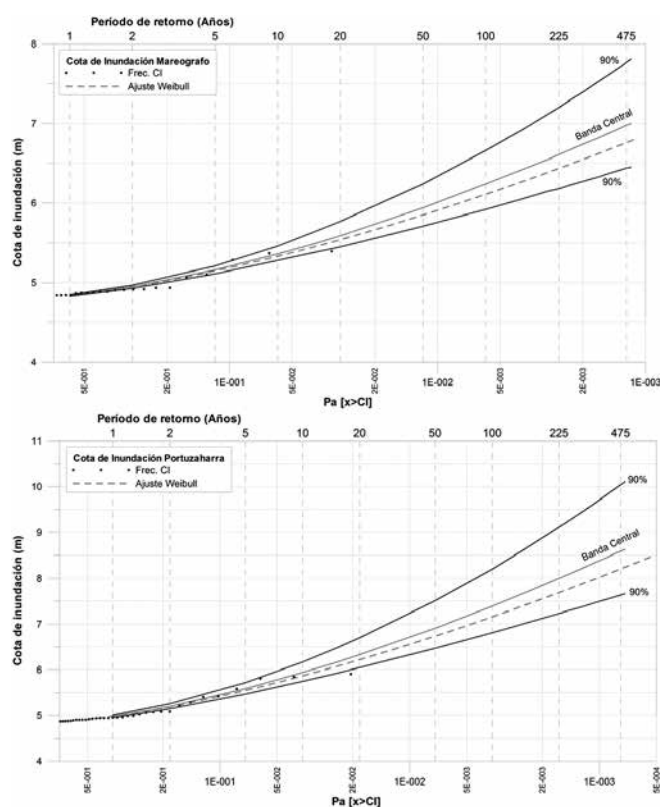


Figura 16. Análisis extremal de la cota de inundación (CI) en los dos puntos de medida de Bermeo respecto al 0 del puerto de Bilbao. Arriba mareógrafo exterior, abajo mareógrafo interior de Portuzaharra.

Las zonas de mismo comportamiento que la zona del mareógrafo tienen $CI_{50 \text{ años}} = 3,8 \text{ m}$ (NMMA-IGN2008 y 5,8 m respecto al 0 de Bilbao) y en aquellas zonas donde se produce una amplificación tendrían $CI_{50 \text{ años}} = 4,7 \text{ m}$ (NMMA y 6,7 m al cero de Bilbao).

En resumen, en la situación actual de NMM, la $CI_{50 \text{ años}}$ en el puerto de Bermeo se sitúa entre 3,8 y 4,7 m. En la Tabla 7 se muestran las $CI_{50 \text{ años}}$ y las áreas afectadas por inundación actualmente, en el escenario RCP4.5 y en el escenario RCP8.5.

7.1. Mapas de inundación de Bermeo

Se puede observar que en condiciones del NMM actual y una Cota de Inundación por oleaje extremo ($Tr = 50 \text{ años}$) y agitación portuaria entre 3,8 m y 4,7 m, las zonas aledañas al puerto se inundan (sombreadas en color azul en la Figura 17).

Escenario	CI respecto al NMM en Alicante	CI respecto al cero del Puerto de Bilbao	Área afectada respecto al NMMA (ha)	Incremento de área inundable (ha)
Actual	[3,8 m – 4,7 m]	[5,8 m – 6,7 m]	11,9	–
RCP4.5	[4,3 m – 5,2 m]	[6,3 m - 7,2 m]	18,3	6,4
RCP8.5	[4,5 m – 5,4 m]	[6,5 m - 7,4 m]	19,3	7,4

Tabla 7. Cota de inundación (CI) y áreas afectadas en cada uno de los escenarios analizados en Bermeo.



Figura 17. Distribución de la cota de inundación (CI) en metros (considerando $Tr=50 \text{ años}$) en Bermeo por la marea y la agitación portuaria respecto al NMMA-IGN2008 y zonas inundadas con esta CI con el NMM actual (sombreado azul).

Si añadimos a la $Cl_{50 \text{ años}}$ el NMM proyectado a 2100 bajo el RCP4.5 (color naranja) y el RCP8.5 (color rojo) se obtienen las zonas de la Figura 18.

Bermeo es una zona piloto que cuenta con una infraestructura crítica por riesgo para el abrigo y la actividad portuaria debido al ascenso del NMM, la marea meteorológica y la resonancia psortuaria. Las zonas potencialmente inundables en Bermeo en las condiciones actuales son el puerto, el parque Lamera y la zona residencial adyacente al puerto, ocupando estas zonas 11,9 ha (Tabla 7).

De los resultados obtenidos se observa que Bermeo es una zona en la que la problemática de inundación está asociada a las condiciones de resonancia portuaria actuales y que el incremento del riesgo, en términos de aumento de las áreas potencialmente inundables, en los escenarios de cambio climático es apreciable.

En el caso del escenario RCP4.5 el ascenso del nivel medio del mar supondría 6,4 ha más de zona urbana inundable: pasando de 11,9 ha potencialmente inundables hoy en día a 18,3 ha a finales del siglo XXI, Tabla 7.

De cumplirse el escenario RCP8.5 el ascenso del nivel medio del mar produciría un aumento de 7,4 ha de la zona potencialmente inundable, desde las 11,9 ha actuales a 19,3 a finales del siglo XXI, Tabla 7.

7.2. Altura de ola sobre el dique de Bermeo

En la Figura 19 se muestra la topobatimetría y los perfiles en los que se ha propagado el oleaje.

Los resultados de la propagación y los cambios de altura de ola significativa a pie de dique en la zona más expuesta al oleaje se muestran en la Tabla 8 (actual, RCP4.5 y RCP8.5). También se muestran el déficit de peso de los bloques de abrigo calculado con la aproximación de Iribarren, 1965, para cada uno de los escenarios, en los perfiles de las zonas más expuestas al oleaje.

Los perfiles 1-11 ($3,8 \text{ m} \leq H_s \leq 6,8 \text{ m}$) se encuentran sobre el contorno norte del puerto y reciben el oleaje de manera directa, en estos perfiles se distinguen dos zonas:

- **Zona 1:** Los perfiles 1-7 están sobre una laja rocosa somera que limita en todos los casos la altura de ola por rotura. En estos casos, la altura de ola máxima que puede llegar al dique en dichas condiciones está limitada por la profundidad, la cual en los perfiles de 1-6 se ve modificada por el efecto del *setup* (aumento del nivel medio debido al oleaje en rotura). El aumento del oleaje

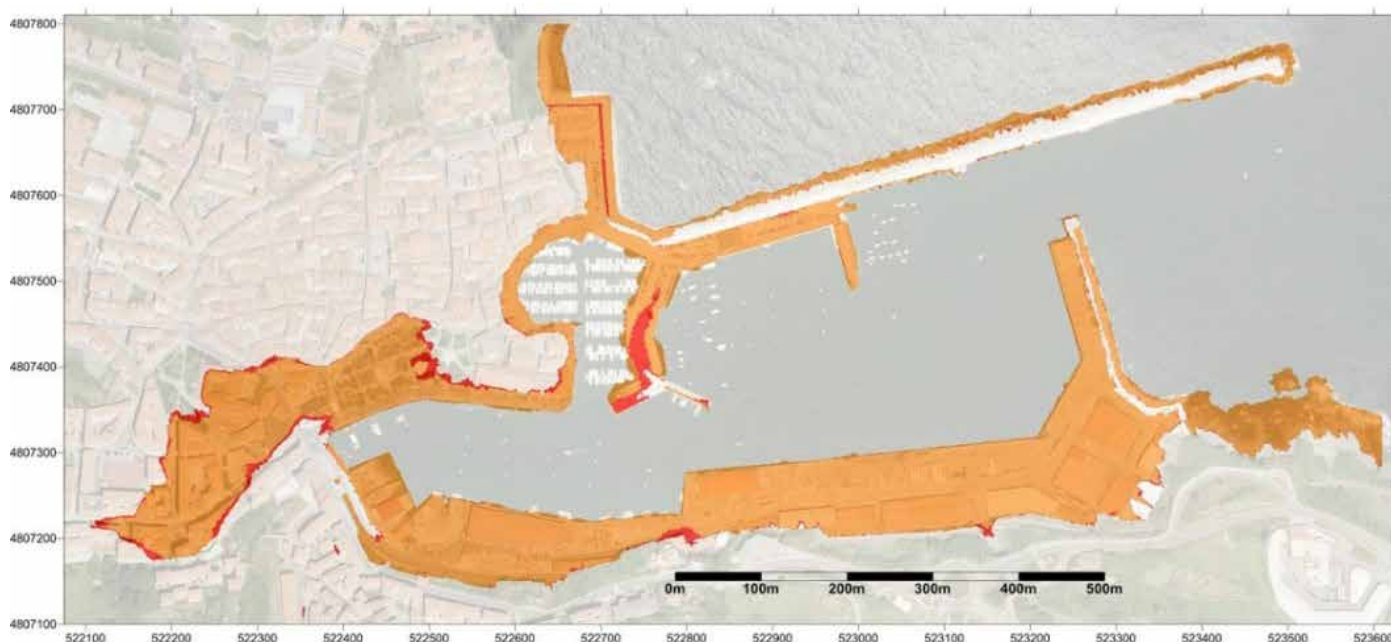


Figura 18. Zonas inundadas de la franja costera de Bermeo bajo condiciones de NMM y una $Cl_{50 \text{ años}}$ proyectado para el año 2100, con el escenario climático RCP4.5 (naranja) y RCP8.5 (rojo).

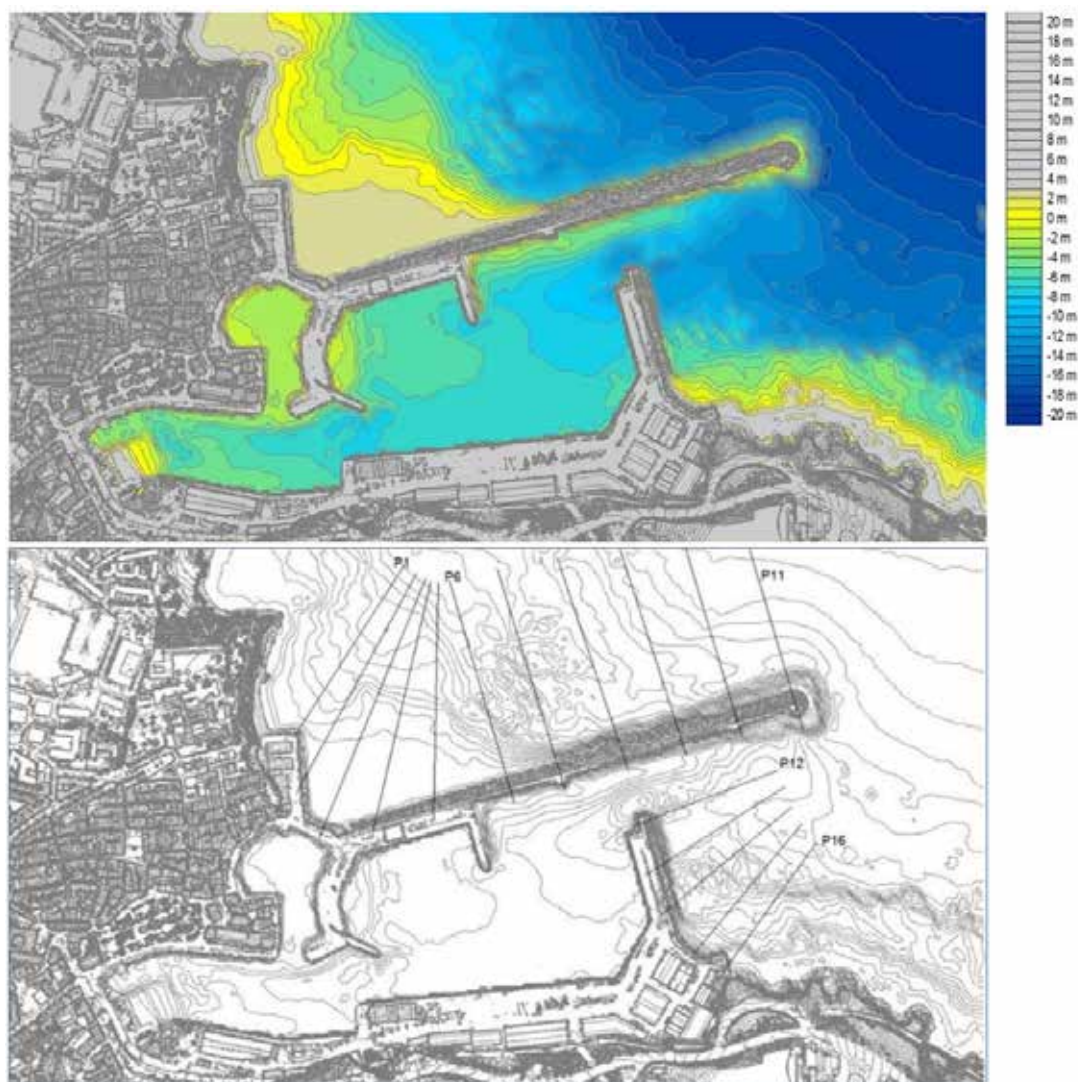


Figura 19. Batimetría en el entorno del puerto de Bermeo y perfiles de cálculo. Isobatas cada 1 m.

en este tramo puede llegar a 0,5 m en el escenario más pesimista (RCP 8.5).

- **Zona 2:** A partir del perfil 8, existe un cambio brusco en la batimetría (aumento en la profundidad a pie de dique), haciendo que el oleaje impacte sin llegar a darse el proceso de rotura y dándose únicamente el proceso de asomeramiento. En estos casos la altura de ola a pie de dique está limitada por las características del temporal y el valor mostrado no refleja la altura máxima si no la Hs de dicho estado de mar. En esta zona, el aumento de la profundidad local debido al efecto del cambio

climático generará un proceso de ‘des-asomeramiento’ y por tanto una disminución en la altura de ola (en un valor muy bajo, entorno 0,1 m).

De los resultados obtenidos se observa que el efecto del ascenso del nivel del mar supondrá un aumento en la altura de ola que incidirá sobre el dique de abrigo, con incrementos de altura de ola entre 0,4 m (RCP4.5) y 0,5 m (RCP8.5) en las zonas más expuestas al oleaje. En términos de peso de los bloques podría estimarse como un déficit máximo del 16% respecto al bloque actual.

Perfil	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
Hs actual	4,5	3,9	3,8	3,9	4,2	4,1	6,2	5,9	4,9	6,1	6,8
Hs RCP 4.5	4,8	4,3	4,1	4,3	4,6	4,5	6,5	5,9	5,8	6,1	6,8
ΔHs (RCP4.5 – actual)	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	0	-0,1	0	0
Déficit peso bloques RCP4.5	6%	11%	8%	11%	10%	10%	3%	0%	-1%	0%	0%
Hs RCP 8.5	5,0	4,4	4,3	4,4	4,7	4,6	6,6	5,8	5,8	6,0	6,9
ΔHs (RCP8.5 – actual)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	-0,1	-0,1	-0,1	0
Déficit peso bloques RCP8.5	11%	15%	16%	15%	13%	14%	4%	-1%	-1%	-1%	0%

Tabla 8. Altura de ola significativa (Hs) a pie de dique en pleamar asociada a un temporal pésimo con un periodo de retorno (Tr) de 50 años en los perfiles más expuestos al oleaje (del P1 al P11, Figura 19).

Conclusiones

El proyecto: “Evaluación del impacto de los componentes del ascenso del nivel del mar de origen climático sobre el litoral vasco (KLIMPACT)”, tiene como objetivos:

- La cuantificación al mm de los componentes del nivel del mar.
- Contribución de cada componente al ascenso observado en los últimos años.
- Evaluar su impacto sobre la costa vasca en emplazamientos muy diferentes: zonas urbanas de ribera (Nervión, Bilbao y Urumea, Donostia), zonas urbanas afectadas por el oleaje (Zarautz y Bermeo)

Para evaluar el efecto del ascenso del nivel medio del mar de las proyecciones para finales del siglo XXI en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 del IPCC (IPCC, AR5) se han evaluado las áreas potencialmente inundables en la actualidad y las áreas potencialmente inundables a finales del siglo XXI. Las áreas potencialmente inundables se han definido en términos de probabilidad, como aquellas áreas que se inundan con un período de retorno de inundación de 50 años. Es decir, se consideran zonas que se inundan frecuentemente y zonas que se inundan únicamente en eventos extraordinarios, de período de retorno de 50 años, pero, con una frecuencia semejante al tiempo que transcurrirá desde la realización del trabajo (2017-2018) hasta finales del siglo XXI.

La distribución de la probabilidad de inundación se ha obtenido con el análisis de los mejores datos de medidas de nivel instantáneo del mar: la serie del mareógrafo de Puertos del Estado en Bilbao.

El aumento del nivel medio del mar producirá un aumento del total de las áreas inundables y, evidentemente, además, que las zonas actualmente inundables lo sean más frecuentemente en el futuro. Una buena localización (a escala de metros en las zonas estudiadas) permitirá proteger esos emplazamientos mitigando el riesgo (elevando la cota del terreno, disponiendo de barreras a la inundación, instalando tanques de avenidas o sistemas de bombeo, etc.) o adaptarse al escenario futuro modificando los usos permitidos o planificados o incorporando medidas de vigilancia, alerta o planes de emergencia adecuados.

Sobre la metodología empleada

- La reconstrucción de datos es eficaz para obtener series continuas, sobre las que aplicar modelos de evolución y filtrado.
- Se han utilizado distintos modelos de evolución: KZA, cambio brusco de tendencia y transición en rampa; que permiten localizar momentos en los que los cambios en el nivel del mar son bruscos y facilitan la interpretación de las causas posibles de dicha variabilidad.
- Los modelos de evolución tienen mejor comportamiento si se aumenta el periodo de filtrado; siendo óptimo cuando se filtran los periodos <5 años y <10 años en las series cortas y largas, respectivamente.
- En general, el modelo de evolución de mejores resultados, en términos de correlación y error, es el de cambio brusco de tendencia, aunque el modelo de transición en rampa muestra resultados similares. El modelo de peores resultados (menor ajuste con las observaciones) es el modelo KZA.

- Aunque dependiendo del modelo de evolución y del periodo de filtrado que utilicemos, se observan cambios bruscos de tendencia en distintas fechas (p. ej. El modelo KZA identifica un cambio brusco para los mareógrafos de Brest, Newlyn y A Coruña en 1990), en la mayor parte de los casos y para todos los mareógrafos se observa una tendencia positiva en el nivel medio del mar.

Sobre el riesgo de inundabilidad bajo escenarios de cambio climático en zonas urbanas en entornos de ribera (zonas piloto: Donostia-San Sebastián y Bilbao)

En la Tabla 9 se muestran las cotas de inundación en Bilbao (estuario del Nervión) y Donostia-San Sebastián (Urumea) y las áreas con riesgo de inundación en el escenario actual, RCP4.5 y RCP8.5. Las áreas afectadas por inundación en el escenario Actual están calculadas respecto a la línea de costa definida como Nivel Medio del Mar en Alicante, por lo que en el escenario actual las áreas corresponden en parte a zonas intermareales (cauces de estuarios, playas y rasas mareales). Las áreas actuales se utilizan para calcular el incremento de área en los escenarios de Cambio Climático (RCP4.5 y RCP8.5) que se señalan entre paréntesis en la Tabla 9.

- Los resultados muestran que el ascenso del NMM tendrá un efecto notable en el interior del estuario del Nervión y en Donostia-San Sebastián.
- En el Nervión, las zonas más vulnerables a la inundación actualmente son los barrios de Alzaga

y Zorrotzaurre. En 2100, las zonas inundables se extenderían a Ibarzaharra-Sestao (RCP4.5) y al barrio de Lamiako (RCP8.5). En el escenario RCP4.5, se estiman en 120 ha las zonas sometidas a inundación y en el RCP8.5 alcanzarían las 224 ha (Tabla 9).

- En Donostia-San Sebastián las zonas más afectadas en la actualidad son el barrio de Loiola, Txomin Enea y polígono Bidebidarte (Astigarraga) y se ampliarían en 2100 sobre todo en los barrios de Loiola y Martutene. De producirse la previsión del escenario RCP4.5 (+0,45 m), 15,4 ha nuevas se podrían considerar como susceptibles de inundación y en el escenario RCP8.5 (+0,65 m) serían 21,9 ha (Tabla 9).

Sobre el riesgo de inundabilidad bajo escenarios de cambio climático en zonas urbanas anexas a playas expuestas al oleaje extremo (zona piloto: Zarautz)

En la Tabla 10 se muestran las Cotas de Inundación para Zarautz y las áreas potencialmente inundables en los tres escenarios considerados. Las áreas consideradas en el escenario Actual como inundables están referidas a la línea de costa correspondiente al Nivel Medio del Mar en Alicante y, los incrementos de área afectada en los escenarios de Cambio Climático se calculan respecto a la situación actual y se señalan en la Tabla 10.

El frente costero de Zarautz es una zona urbana vulnerable a inundación por combinación de marea (astronómica y meteorológica) y oleaje. Por este motivo, Zarautz está siendo la zona de referencia para la operativa de alertas

Cotas de Inundación (CI)			Bilbao	Donostia
Escenario	CI respecto al NMM en Alicante (m)	CI respecto al cero del Puerto de Bilbao (m) ³	Área afectada (ha)	Área afectada (ha)
Actual	3,01	5,07	107	4,5
RCP4.5 (+0,45 m)	3,46	5,52	227 (120)	19,9 (15,4)
RCP8.5 (+0,65 m)	3,66	5,72	331 (224)	26,4 (21,9)

Tabla 9. Cotas de Inundación respecto al NMM en Alicante y respecto al cero del Puerto de Bilbao y áreas afectadas por inundación en los tres escenarios en las zonas piloto de Bilbao y Donostia-San Sebastián (entre paréntesis y en negrita se muestran los incrementos de área potencialmente inundable a finales del siglo XXI en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 respecto a la situación actual).

³ Se ha utilizado como referencia del Nivel del Mar en este estudio la serie de datos de Puertos del Estado del mareógrafo de Bilbao.

Zarautz			
Escenario	CI respecto al NMM en Alicante (m)	CI respecto al cero del Puerto de Bilbao (m)	Área afectada (ha)
Actual	[8,5 – 9,3]	[8,5 – 9,3]	18,1
RCP4.5 (+0,45 m)	[7 – 7,8]	[9 – 9,8]	18,5 (0,4)
RCP8.5 (+0,65 m)	[7,2 – 8]	[9,2 – 10]	18,8 (0,7)

Tabla 10. Cotas de Inundación respecto al NMM en Alicante y respecto al cero del Puerto de Bilbao y áreas afectadas por inundación en los tres escenarios considerados en Zarautz (entre paréntesis y en negrita se muestran los incrementos de área potencialmente inundable a finales del siglo XXI en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 respecto a la situación actual).

océano-meteorológicas de inundación del frente costero. Zarautz es, de las cuatro zonas analizadas, la que tiene las cotas de inundación más altas, respecto al cero del Puerto de Bilbao la CI actual por mareas y oleaje se sitúa entre [8,5 m – 9,3 m] y en el escenario RCP8.5 más pesimista llegaría a la cota de 10 m.

Hoy en día, amplias zonas de la franja costera de Zarautz son inundables por combinación de marea y oleaje extremo. El riesgo de inundación en Zarautz varía espacialmente, es mayor al oeste, aunque la CI sea menor, pues el paseo es más bajo. En los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, prácticamente todo el paseo marítimo se inundaría con nivel extremo o severo. Con estos escenarios de cambio climático el nivel de impacto que sufre actualmente la zona oeste se trasladaría a todo el frente urbano. También se agravaría la inundación en la carretera Zarautz a Getaria. En esta zona piloto, el efecto del Cambio Climático en cuanto a incremento de las áreas eventualmente afectadas

por inundación es pequeño (0,4 ha en RCP4.5 y 0,8 ha en RCP8.5), aunque el grado de inundación en algunas zonas pasaría de inundación severa en la actualidad (espesores de agua entre 1 y 2 m) a inundación extrema (espesores entre 2 y 4 m).

Sobre el riesgo de inundabilidad bajo escenarios de cambio climático en zonas portuarias en entorno urbano (zona piloto: Bermeo)

En la Tabla 11 se muestran las Cotas de Inundación para Bermeo y las áreas potencialmente inundables en los tres escenarios considerados. Al igual que en los casos anteriores, las áreas consideradas en el escenario Actual como inundables están referidas a la línea de costa correspondiente al Nivel Medio del Mar en Alicante y, los incrementos

Bermeo			
Escenario	CI respecto al NMM en Alicante (m)	CI respecto al cero del Puerto de Bilbao (m)	Área afectada (ha)
Actual	[3,8 – 4,7]	[5,8 – 6,7]	11,9
RCP4.5 (+0,45 m)	[4,3 – 5,2]	[6,3 – 7,2]	18,3 (6,4)
RCP8.5 (+0,65 m)	[4,5 – 5,4]	[6,5 – 7,4]	19,3 (7,4)

Tabla 11. Cotas de Inundación respecto al NMM en Alicante y respecto al cero del Puerto de Bilbao y áreas afectadas por inundación en los tres escenarios considerados en Bermeo (entre paréntesis y en negrita se muestran los incrementos de área potencialmente inundable a finales del siglo XXI en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 respecto a la situación actual).

de área afectada en los escenarios de Cambio Climático se calculan respecto a la situación actual y se señalan en esta Tabla 11.

Bermeo es una zona con una infraestructura crítica con riesgo para el abrigo y la actividad portuaria debido al ascenso del NMM, la marea meteorológica y la resonancia portuaria. Como Zarautz, la CI tiene una importante variabilidad espacial debido a la resonancia portuaria que aumenta su amplitud en las zonas más internas del puerto y más próximas a las áreas residenciales de la localidad. Las zonas potencialmente inundables en Bermeo son el puerto, el parque Lamera y la zona residencial adyacente al puerto. Se observa que es una zona en la que la problemática de inundación está asociada a las condiciones de resonancia portuaria actuales y que el incremento del riesgo, en términos de aumento de las áreas potencialmente inundables, en los escenarios de cambio climático es apreciable ya que supondría 6,4 ha más de zona urbana inundable en el escenario RCP4.5 y 7,4 ha en el escenario RCP8.5, respecto a la situación actual.

En Bermeo se ha analizado también el efecto del aumento del nivel del mar en la propagación del oleaje extremo sobre el dique de abrigo del puerto. El efecto del ascenso del nivel del mar supondrá un aumento en la altura de ola que incidirá sobre el dique de abrigo, con incrementos de altura de ola entre 0,4 y 0,5 m en las zonas más expuestas al oleaje. En términos de peso de los bloques podría estimarse como un déficit máximo del 16% respecto al bloque actual. Esta estima debe tomarse con precaución y analizarse en función de los coeficientes de seguridad del proyecto actual de dique. No obstante, no se espera un impacto importante en la merma del abrigo del puerto, debido a que estos coeficientes de seguridad suelen estar por encima del 16%.

Bibliografía

-
- Camus P., Losada I.J., Izaguirre C., Espejo A., Menendez M., Perez J. (2017) *Statistical wave climate projections for coastal impact assessments*, Earth's Future.
 - Charles E., Idier D., Delecluse P., Déqué M., Le Cozannet G. (2012) *Climate change impact on waves in the Bay of Biscay*, France. Ocean Dynamics, pp. ODYN-D-11-00186R1.
 - Chust, G., Borja, Á., Caballero, A., Irigoien, X., Sáenz, J., Moncho, R., Marcos, M., Liria, P., Hidalgo, J., Valle, M. & Valencia, V. (2011) *Climate change impacts on coastal and pelagic environments in the southeastern Bay of Biscay*. Climate Research, 48, 307–332.
 - Chust, G., Caballero, A., Marcos, M., Liria, P., Hernández, C. & Borja, Á. (2010) *Regional scenarios of sea level rise and impacts on Basque (Bay of Biscay) coastal habitats, throughout the 21st century*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 87, 113-124.
 - González, M., Caballero, A., Chust, G., Liria, P., Epelde, I., de Santiago, I., 2018. *Evaluación del impacto de los componentes climáticos del ascenso del nivel del mar sobre el litoral vasco, Proyecto KLIIMPACT*. Revista de Investigación Marina, 2018, 25(2).
 - IPCC, 2013: Climate Change 2013: *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.
 - Iribarren, R., 1965. *Formule pour le Calcul des Diques en Enrochements Naturels ou Elements Artificiels*. XXI Int. Nav. Congress. Stockholm. Section II-4.
 - Liria, P., Colominas, M., González, M. 2013. *Régimen extremal en la zona BIMEP*. Elaborado por AZTI-Tecnalia para Departamento de Desarrollo Económico y Competitividad, Viceconsejería de Tecnología, Innovación y Competitividad.
 - Slangen, ABA, Carson, M, Katsman, CA, van de Wal, RSW, Köhl, A, Vermeersen, LLA, et al. (2014) *Projecting twenty-first century regional sea-level changes*. Clim Change, 124:317–32.
 - Toimil, A., Losada, I.J., Camus, P. (2016) *Metodología para el análisis del efecto del cambio climático en la inundación costera: aplicación a Asturias*. Rev Iber Del Agua, 3, 56-65.

10

Glosario de términos

CI: Cota de inundación

Altura de la lámina de agua del mar sobre un nivel de referencia determinado (por ejemplo, el nivel medio del mar en Alicante o el cero de algún puerto). Esta elevación de la lámina de agua se debe a la marea astronómica, a la marea meteorológica y al *run-up* del oleaje (la zona en la que las olas suben y bajan por una pendiente inclinada, como, por ejemplo, una playa). Generalmente, en la CI no se consideran otros procesos como las salpicaduras o *splash* que produce el oleaje al romper en situaciones de fuerte viento o al chocar con un dique.

CI_{50años}

Cota de inundación alcanzada considerando un periodo de retorno de 50 años.

Distribución Weibull

Distribución de probabilidad que se utiliza entre otras aplicaciones en el análisis estadístico de valores extremos para modelizar el riesgo de eventos o situaciones extremas o atípicas como, por ejemplo, situaciones de temporales de oleaje poco frecuentes o valores muy altos de CI.

Hs

La altura significativa o significante. Es la media aritmética de la altura del tercio de olas más altas registradas en un período de 20 a 30 minutos. Su valor se aproxima a la altura de las olas que percibe visualmente un observador experimentado, puesto que éste pone inconscientemente más atención a las olas mayores.

IPCC: *Intergovernmental Panel on Climate Change*

Panel Intergubernamental del Cambio Climático.

KZA

Son las siglas de un tipo de método de filtrado de serie de datos. *Filtro Kolmogorov-Zurbenko Adaptativo*. Se basa en realizar medias móviles de una serie de datos, eligiendo de forma adecuada el período de promediado de los datos de manera que es una técnica capaz de localizar cambios bruscos de patrón, por ejemplo, cambios en los valores medios, cambios en la pendiente de evolución, etc. Se ha aplicado a muy diversas ramas de la ciencia, desde la salud (efecto de los insecticidas en la prevalencia de enfermedades como la malaria), mejora en las condiciones ambientales de una masa de agua por efecto de la entrada en funcionamiento de estaciones depuradoras de aguas residuales, cambios en el nivel medio del mar, etc.

Marea astronómica

Es el cambio periódico del nivel del mar producido por las fuerzas de atracción gravitatoria que ejercen el Sol y la Luna sobre la Tierra.

Marea meteorológica

Es el cambio periódico del nivel del mar producido por el efecto de fenómenos meteorológicos, principalmente por el viento, la presión atmosférica y los cambios de temperatura del mar. El efecto más evidente es el de la presión atmosférica; al aumentar la presión, al paso de un anticiclón, el nivel medio del mar baja unos centímetros, mientras

que durante el paso de una borrasca la disminución de la presión atmosférica produce un aumento del nivel del mar (en el caso de borrascas muy profundas como los huracanes el aumento del nivel del mar debido a la componente meteorológica puede llegar a decenas de centímetros e incluso rondar un metro de altura). En este trabajo se ha distinguido entre **marea meteorológica de baja** (período superior a 2 horas, típicamente debida a la presión atmosférica) **y de alta frecuencia** (período inferior a 2 horas, debido a la variabilidad del viento, fundamentalmente).

MDE: Modelo Digital de Elevaciones

Es un conjunto de datos (normalmente altura del terreno respecto a una referencia dada, por ejemplo, el nivel medio del mar o el cero de un puerto) en forma de valores (x,y,z) que permite describir la forma de un espacio de superficie terrestre.

NMM: Nivel Medio del Mar

Es la posición media del nivel del mar durante un período de tiempo suficientemente largo para que sea representativo. Se calcula registrando la altura del mar en un punto de costa, preferiblemente donde la marea tenga una amplitud pequeña (que el nivel no varíe mucho con el tiempo, por ejemplo, en España: Alicante) y calculando el valor medio de esas medidas.

NMMA: Nivel Medio del Mar en Alicante

IGN 2008 hace referencia a la nivelación realizada por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) en 2008. El nivel medio del mar en un punto de la costa debe de ser trasladado topográficamente a otros puntos del territorio (puntos de referencia marcados por placas o clavos de posición conocida, por ejemplo, placas con la altura sobre el nivel medio que se pueden ver en estaciones de ferrocarril, catedrales o ayuntamientos). De esa manera, en los trabajos de topografía y geodesia locales, en lugar de tener que trasladar la cota del nivel medio del mar desde cientos o miles de kilómetros con el error consiguiente, solamente se tiene que trasladar desde una distancia más cercana. Ese traslado del nivel medio del mar, que en España es en Alicante, lo realizan instituciones geodésicas (IGN, Instituto Geográfico Nacional) que actualizan y mejoran periódicamente esa información, por ejemplo, en el año 2008.

NMMB: Nivel Medio del Mar en Bilbao

Véase **NMMA**.

POT

Son las siglas de una metodología (*Peak Over Threshold*). Es una técnica de selección de valores inusualmente atípi-

cos utilizada para estudiar eventos o situaciones extremas. Si se dispone de una serie de medidas suficientemente larga, por ejemplo, del oleaje; y se desean analizar los valores extremos de la altura de ola, para distinguir entre las medidas los valores que se corresponden con oleajes bajos, medios o moderadamente altos de aquellos que se producen durante tormentas fuertes, se debe establecer un criterio. El criterio puede ser que la altura de ola supere un cierto valor (5 m, por ejemplo) y que entre dos alturas de ola superiores a 5 m transcurran más de 48 horas (para no representar en exceso tormentas que duren mucho tiempo y que pertenecen al mismo episodio de mal tiempo frente a otras tormentas de duración más corta pero, que pueden tener alturas de ola tan grandes o mayores que las anteriores).

RCP: Representative Concentration Pathways (Trayectorias de Concentración Representativas)

Escenarios definidos por el IPCC que abarcan series temporales de emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero, aerosoles y gases químicamente activos, así como el uso del suelo y la cubierta terrestre. La palabra "representativa" significa que cada trayectoria de representación ofrece uno de los muchos posibles escenarios que conducirían a las características específicas de forzamiento radiativo. La palabra "trayectoria" hace hincapié en que únicamente son de interés los niveles de concentración a largo plazo, pero también indica el camino seguido a lo largo del tiempo para llegar al resultado en cuestión. Las trayectorias de concentración representativas generalmente hacen referencia a la parte de la trayectoria de concentración hasta el año 2100, para las cuales los modelos de evaluación integrados han producido los correspondientes escenarios de emisión. Existen varios RCPs, los que se utilizan en el presente proyecto son el RCP4.5 y el RCP8.5 descritos en el último informe del IPCC (IPCC, 2013) en lo relativo a las proyecciones de la evolución del NMM.

Tr: Periodo de retorno

Es una estimación de la probabilidad de ocurrencia de un evento determinado en un periodo determinado. Ese periodo de tiempo puede entenderse como el lapso promedio que separa dos eventos de determinada magnitud. Por ejemplo, supongamos que la altura de ola de período de retorno 50 años es 8,25 m; esto no quiere decir que ocurra siempre que cada 50 años se produzca un temporal con olas de 8,25 m; de hecho, la probabilidad de que en 50 años haya uno o más temporales en que se superen los 8,25 m es de casi 2/3 partes (63,4%).

10

Anexos

Nombre mareógrafo	Periodo	Número de datos	% huecos	Valores medios	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo
Bilbao PdE	1992-2017	2.637.246	0,54	2.394	1.025	-290	4.990
Gijón PdE	1992-2017	2.637.845	0,55	2.746	1.007	160	5.400
Santander PdE	1992-2017	2.282.058	2,62	2.858	1.029	280	5.380
Pasaia	2007-2017	1.001.725	11,3	3.526	1.060	935	6.057
A Coruña	1943-2017	631.008	3,3	2.653	920	260	5.120
Brest	1846-2017	1.376.134	8,7	4.053	1.599	-150	8.100
Newlyn	1915-2017	885.793	1,9	3.128	1.331	-1.944	9.030
Santander (IEO)	1943-2004	520.980	4,9	2.791	1.016	160	5.350

Tabla 12. Detalles del análisis estadístico aplicado a las series temporales de nivel del mar de cada mareógrafo (en mm).

Emplazamiento	Período de retorno (años)	20	50	225	475
Gijón	Estima Central de sobreelevación debido a Residuo Meteorológico (cm)	71	77	87	92
	Banda Superior 90% (cm)	79	87	103	111
Santander	Estima Central de sobreelevación debido a Residuo Meteorológico (cm)	64	68	75	77
	Banda Superior 90% (cm)	69	75	84	88
Bilbao	Estima Central de sobreelevación debido a Residuo Meteorológico (cm)	59	65	74	79
	Banda Superior 90% (cm)	67	75	91	69

Tabla 13. Sobreelevación debida a la marea meteorológica en Bilbao, Santander y Gijón (datos de marea cada 5 minutos desde 1992-2017, fuente Puertos del Estado).

Gijón				Santander		Bilbao	
Nombre	Período (h)	Ampl. (mm)	Áng. (°)	Ampl. (mm)	Áng. (°)	Ampl. (mm)	Áng. (°)
Z0	∞	2.745,5	0	2.791,0	0	2.370,3	0
M2	12,42	1.294,5	349,53	1.302,8	173,12	1.318,0	350,57
S2	12	450,2	120,72	451,6	128,06	458,6	121,80
N2	12,66	271,7	82,18	273,4	175,76	278,2	83,66
K2	11,97	123,0	278,65	128,1	286,66	123,4	278,02
K1	23,94	65,6	59,55	63,7	61,78	62,2	56,83
O1	25,82	66,3	232,87	70,7	50,84	67,5	231,81

Tabla 14. Resumen de los resultados del análisis armónico de la serie de datos de Puertos del Estado: Gijón, Santander y Bilbao.

		Brest		Newlyn		A Coruña		Santander	
Nombre	Período (h)	Ampl. (mm)	Áng. (°)	Ampl. (mm)	Áng. (°)	Ampl. (mm)	Áng. (°)	Ampl. (mm)	Áng. (°)
Z0	∞	4.052,9	0,00	3.140,5	0	2.652,4	0	2.791,0	0
M2	12,42	2.054,1	186,22	1.708,9	129,86	1.177,1	229,07	1.302,8	173,12
S2	12	748,4	148,13	571,0	178,19	412,3	116,26	451,6	128,06
N2	12,66	417,7	189,69	327,7	342,69	247,8	219,16	273,4	175,76
K2	11,97	210,3	305,17	161,9	336,14	116,4	274,28	128,1	286,66

Tabla 15. Resumen de los resultados del análisis armónico de las series de datos de larga duración: Brest, Newlyn, A Coruña y Santander.

Δ Nivel (mm)	Periodo	KZA				Cambio de tendencia				Rampa			
		Sin T<1 año	Sin T<2 años	Sin T<5 años	Sin T<10 años	Sin T<1 año	Sin T<2 años	Sin T<5 años	Sin T<10 años	Sin T<1 año	Sin T<2 años	Sin T<5 años	Sin T<10 años
Bilbao PdE	1992-2017	66	62	37	–	91	85	62	–	64	63	60	–
Gijón PdE	1992-2017	26	28	4	–	27	33	39	–	26	29	24	–
Santander PdE	1992-2017	36	33	17	–	63	58	40	–	27	25	28	–
Pasaia	2007-2017	7	36	–	–	40	101	–	–	26	78	–	–
A Coruña	1943-2017	97	93	87	82	171	169	165	158	113	110	105	99
Brest	1846-2017	194	193	191	188	188	187	186	182	183	182	180	177
Newlyn	1915-2017	169	168	163	154	203	204	200	196	185	186	184	178
Santander	1943-2004	87	85	80	77	217	206	103	103	121	103	93	68

Tabla 16. Variación del nivel medio entre el inicio del registro y el final del conjunto de series de nivel del mar con los diferentes modelos de evolución temporal.

Δ Nivel (mm); b (mm año⁻¹)	Periodo	Sin T<1 año	Sin T<2 años	Sin T<5 años	Sin T<10 años
Bilbao PdE	1992-2017	$\Delta=70$ b=2,83	$\Delta=67$ b=2,83	$\Delta=60$ b=2,73	-
Gijón PdE	1992-2017	$\Delta=12$ b=0,54	$\Delta=15$ b=0,74	$\Delta=13$ b=0,71	-
Santander PdE	1992-2017	$\Delta=37$ b=1,50	$\Delta=35$ b=1,47	$\Delta=29$ b=1,31	-
Pasaia	2007-2017	$\Delta=7$ b=0,88	$\Delta=69$ b=7,55	-	-
A Coruña	1943-2017	$\Delta=130$ b=1,76	$\Delta=125$ b=1,72	$\Delta=117$ b=1,65	$\Delta=111$ b=1,62
Brest	1846-2017	$\Delta=205$ b=1,20	$\Delta=205$ b=1,20	$\Delta=203$ b=1,20	$\Delta=199$ b=1,20
Newlyn	1915-2017	$\Delta=191$ b=1,88	$\Delta=190$ b=1,89	$\Delta=187$ b=1,89	$\Delta=180$ b=1,86
Santander	1943-2004	$\Delta=121$ b=1,98	$\Delta=115$ b=1,91	$\Delta=103$ b=1,76	$\Delta=99$ b=1,77

Tabla 17. Variación del nivel medio entre el inicio del registro y el final y pendiente (mm año⁻¹) al aplicar el modelo lineal a las series de marea filtradas.

EUSKO JAURLARITZA



GOBIERNO VASCO

INGURUMEN, LURRALDE PLANGINTZA
ETA ETXEBIZITZA SAILA

DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE,
PLANIFICACIÓN TERRITORIAL Y VIVIENDA

www.ihobe.eus
www.ingurumena.eus